جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره بیست و نهم، بهار ۱۳۹۸

صص ۸۲- ٦٥

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v7i2.66301

ارائه یک سامانه پشتیبان تصمیم مبتنی بر GIS برای مکان‌یابی اقدامات حفاظت آب‌وخاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کاخک)

مطهره دهقان – دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محمود آذری[1] – استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

عادل سپهر– استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹٦/٥/۱ تاریخ تصویب: ۱۳۹٦/۱۲/۸

چکیده

تعیین و اولویت‌بندی مناطق مناسب جهت اجرای اقدامات حفاظت آب‌وخاک از تصمیمات مهم در پروژه‌های آبخیزداری است که نیاز به تحلیل اطلاعات مکانی حوضه و انطباق آن با استانداردهای اقدامات است. احداث تراس و بانکت از جمله اقدامات حفاظت آب‌وخاک می‌باشد که سابقه طولانی در کشور دارد. این تحقیق با هدف ارائه یک سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر GIS به‌منظور تعیین مکان مناسب احداث تراس و بانکت‌بندی و اولویت‌بندی آن، در حوزه کاخک استان خراسان رضوی انجام شد. بدین منظور معیارهای لازم شامل شیب، بارندگی، رواناب، بافت خاک، عمق خاک، کاربری اراضی و فاصله از الگوی زهکشی از منابع مختلف گردآوری شد و با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی اهمیت نسبی هر معیار و طبقات هر معیار تعیین گردید. با اعمال وزن‌های نهایی در نقشه‌های معیارها در سامانه اطلاعات جغرافیایی نقشه تناسب حوضه برای هر اقدام تعیین شد. نتایج نشان داد که ٤ و ۷ درصد از سطح حوزه به ترتیب بسیار مناسب و مناسب برای احداث تراس است و ٥ و ١٤ درصد به ترتیب بسیار مناسب و مناسب برای احداث بانکت است. مقایسه وسعت عملیات اجرا شده با نتایج تحقیق نشان داد که ٥٩ درصد بانکت‌ها و ۲۱/۸ تراس‌های اجرا شده در حوضه در طبقات بسیار مناسب و مناسب واقع شده است. سیستم حاضر می‌تواند در تصمیم‌گیری بهتر مدیران آبخیز و دست‌اندرکاران حفاظت آب‌وخاک مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی، اولویت‌بندی، تحلیل سلسله مراتبی، GIS، حوضه کاخک.

۱ نویسنده مسئول: ۰٥۱۳۸۸۰٥٤۷۳ Email: m.azari@um.ac.ir

۱- مقدمه

بحران آب و فرسایش خاک از مهم‌ترین تهدیداتی است که امنیت آب‌وخاک کشور را به خطر انداخته است. به‌منظور حل این مشکلات، اقداماتی نظیر احداث سدهای مخزنی، تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، پخش سیلاب و حفاظت آب‌وخاک در سطح حوضه در قالب برنامه‌های آبخیزداری انجام شده است. اقدامات حفاظت آب‌وخاک در کاهش فرسایش، تولید محصول، کاهش رسوب ورودی به مخازن سدها و افزایش تغذیه آب‌های زیرزمینی نقش مؤثری دارند (Hunink et al., 2012). این اقدامات شامل استحصال آب (استفاده بهینه از جریان مازاد سطحی برای کشاورزی)، اجرای اقدامات سازه‌ای (تراس، پشته، سدهای ذخیره‌ای و اصلاحی) و مدیریت خاک و اقدامات زراعی (مالچ و پوشش گیاهی) است (Krois & Schulte, 2014).

تراس[1] یکی از اقدامات بیومکانیکی آبخیزداری است که در آن درجه شیب زمین با انجام خاکبرداری تغییر کرده و زمین حالت پلکانی پیدا می‌کند (سازمان جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری، ۱۳۸۷). بانکت[2] نیز کانال‌های ممتد یا منقطعی هستند که در جهت عمود بر شیب دامنه با هدف جمع‌آوری رواناب و یا هدایت آن احداث می‌شود. این عملیات با هدف کاهش فرسایش خاک، کنترل رواناب، افزایش رطوبت نسبی و ایجاد بستر رشد گیاه در اراضی جنگلی و مرتعی انجام می‌شود (اسمعلی و عبدالهی، ۱۳۸۹). تفاوت کلی تراس با بانکت در این است که تراس در طول شیب زمین اثر نموده و شکل ظاهری زمین را تغییر می‌دهد؛ درحالی‌که بانکت فقط در بخش از دامنه اجرا شده و طول شیب را کاهش می‌دهد (سازمان جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری، ۱۳۸۷). انتخاب مکان مناسب و اولویت‌بندی مناطق برای هر اقدام حفاظتی در یک آبخیز، نیاز به جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل حجم زیادی از اطلاعات دارد، لذا استفاده از روش‌های نوین تصمیم‌گیری سودمند است. تصمیم‌گیری چند معیاره[3] یکی از این روش‌هاست که شامل تصمیم‌گیری چندهدفه[4] و چند شاخصه[5] است (نادری و همکاران، ۱۳۹۰؛ جایسوالا و همکاران، ۲۰۱۵). مدل‌های چند هدفه قادر به بهینه‌سازی اهداف مختلف هستند و مدل‌های چند شاخصه برای انتخاب گزینه برتر استفاده می‌شوند (Mendoza et al., 2006). روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[6] یکی از پرکاربردترین این روش‌هاست که توسط ساعتی[7] برای تصمیم‌گیری در مورد مسائل پیچیده با عوامل ارائه شده است (قدسی‌پور، ۱۳۸٤).

1 Terrace
2 Channel Terrace
3 Multi-Criteria Decision Making (MCDM)
4 Multi Objective Decision Making (MODM)
5 Multi Attribute Decision Making(MADM)
6 Analytic Hierarchy Process (AHP)
7 Saaty

مطالعات متعددی با هدف تعیین مناطق مناسب جهت اجرای اقدامات حفاظت آب‌وخاک و جمع‌آوری رواناب در دنیا انجام شده‌است.Mbilinyi و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری[1] و سامانه اطلاعات جغرافیایی مناطق بالقوه استحصال آب باران را در دو منطقه از حوضه مکانی کلیمانجارو شناسایی کردند. نتایج پژوهش نشان داد که به ترتیب ۴۰ و ۴۱/۴ درصد از حوضه برای اجرای اقدامات جمع‌آوری رواناب مناسب و بسیار مناسب است و ۳۶/۹ درصد آن نسبتاً مناسب است. De Winnaar و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از خصوصیات خاک، کاربری اراضی، بارندگی و اطلاعات شیب مناطق مناسب برای جمع‌آوری رواناب را در حوضه پوتیشنی آفریقای جنوبی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی شناسایی کردند. Krois & Schulte (۲۰۱۴) با هدف تشخیص مکان‌های بالقوه برای روش‌های حفاظت آب‌وخاک در حوزه آبخیز رونکیلو در شمال کشور پرو، از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش ارزیابی چند متغیره[2] استفاده نمودند. نتایج تحقیق نشان داد حدود ۴۴٪ از مساحت حوزه آبخیز برای اجرای تراس و ۲۴٪ از حوضه برای سیستم پشته مناسب است. Madan و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی به مکان‌یابی مناطق مناسب بانکت و سد اصلاحی در حوضه بینپور پرداختند و مناطق بالقوه در حوضه مورد مطالعه را به سه دسته خوب و متوسط و ضعیف تقسیم کردند. همچنین Tumbo و همکاران (۲۰۰۷) با در نظر گرفتن معیارهای بارندگی، شیب، فاصله از الگوی زهکشی، رواناب و خصوصیات خاک، سطوح مناسب جهت احداث تراس‌های سکویی، تراس‌های سنگی و بانکت را در حوضه مکانیا آفریقا تعیین کردند.

در مطالعاتی که در داخل کشور انجام شده است از برخی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مانند تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل سلسله مراتبی فازی در مکان‌یابی استفاده شده است؛ به‌عنوان نمونه مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی (رمضانی مهریان و همکاران، ۱۳۹۰؛ حبیبی، ۱۳۹۱؛ ملکی و همکاران، ۱۳۸۸؛ مهدوی و همکاران، ۱۳۸۹)، پخش سیلاب (چابک بلداجی و همکاران، ۱۳۸۹؛ ابراهیمی محمدی و همکاران، ۱۳۹۰؛ آل- شیخ و همکاران، ۱۳۷۹)، مناطق مناسب استحصال آب باران (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۰؛ خیرخواه و همکاران، ۱۳۹۴) و احداث سد زیرزمینی (پیرمرادی و همکاران، ۱۳۸۹؛ چزگی و همکاران، ۱۳۸۹) با بهره‌گیری از تحلیل سلسله مراتبی تعیین شده است؛ اما در خصوص مکانیابی اقدامات حفاظت آب‌وخاک در سطح حوضه مطالعات چندانی انجام نشده است.

در مجموع با توجه به اهمیت انتخاب مکان مناسب برای اقدامات حفاظت آب‌وخاک و نقشی که در موفقیت یک پروژه آبخیزداری دارد این تحقیق با هدف استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و روش تحلیل سلسله

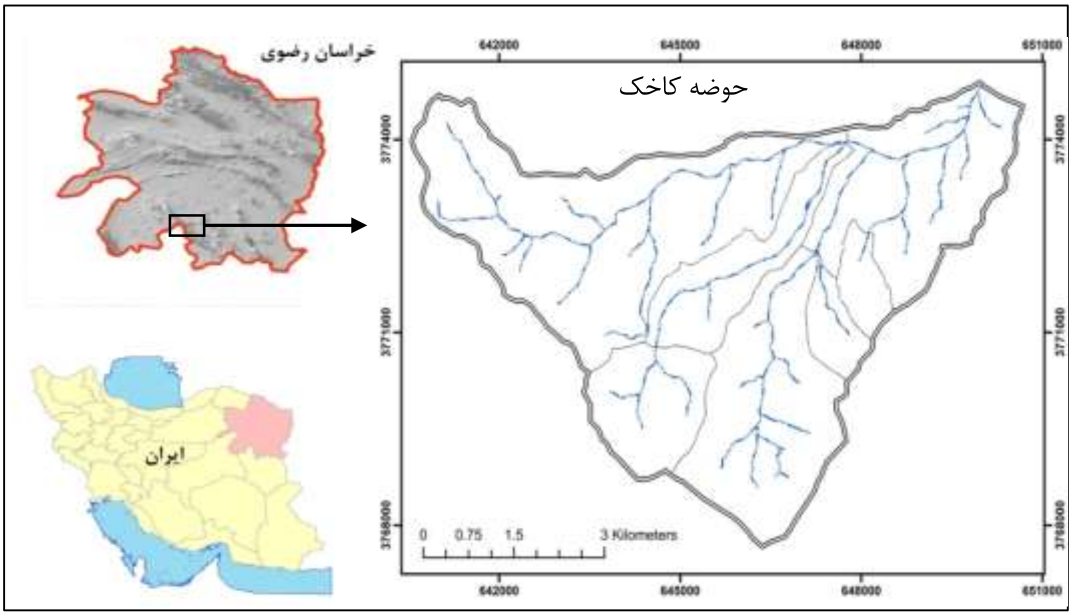
1 Decision Support System (DSS)
2 Multi-Criteria Evaluation (MCE)

مراتبی در مکان‌یابی دو اقدام تراس و بانکت در حوضه آبخیز کاخک در اسـتان خراسـان رضـوی و شهرسـتان گنابـاد انجام شد. بدین منظور از سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل اطلاعات مکانی استفاده شـد و یافتـه‌هـای تحقیـق بـا عملیات اجرا شده در سطح حوضه مقایسه گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این تحقیق حوزه آبخیز کاخک است که در محدوده طول‌های جغرافیـایی "۲۲ '۳۱ °۵۸ تـا "۰۱ '۳۸ °۵۸ شرقی و عرض‌های جغرافیـایی "۲۵ '۰۲ °۳٤ تـا"۱٤ '۰٦ °۳٤ شـمالی در اسـتان خراسـان رضـوی و جنـوب غربی شهرستان گناباد واقع گردیده است (شـکل ۱). مسـاحت حوضـه ۳۷/۱۸ کیلومترمربـع و متوسـط شـیب آن ۳۱ درصد است. این حوضه بخشی از بزرگ آبخیز کویر نمک است. متوسط بارندگی سالانه حوضه ۲۷۹ میلـی‌متـر اسـت که ۵۸/٤ درصد آن در فصل زمستان می‌بارد (اداره کل منابع طبیعـی و آبخیـزداری خراسـان رضـوی، ۱۳۸٦). نظـر بـه اهمیت حوضه مورد مطالعه، عملیات آبخیزداری بیولوژیک شامل نهال‌کاری، کپـه‌کـاری، بذرپاشـی و قـرق و اقـدامات سازه‌ای شامل احداث سدهای اصلاحی، تراس و بانکـت در حوضـه انجـام شـده اسـت همچنـین بخشـی از حوضـه به‌عنوان حوضه زوجی مورد پایش و ارزیـابی آبخیـزداری قـرار دارد (اداره کـل منـابع طبیعـی و آبخیـزداری خراسـان رضوی، ۱۳۸٦).



شکل ۱- موقعیت حوضه کاخک در استان خراسان رضوی و ایران

۲-۲- انتخاب معیارهای مؤثر در انتخاب مکان مناسب برای تراس و بانکت

در این تحقیق ابتدا با بررسی منابع و مطالعات انجام شده و همچنین استفاده از نظرات کارشناسی معیارهای لازم برای مناطق مناسب برای اجرای تراس و بانکت استخراج گردید. بر طبق تمام مطالعات صورت گرفته، عوامل تعیین کننده شامل: اقلیم، هیدرولوژی، وضعیت توپوگرافی، خاک، کاربری اراضی، عوامل اقتصادی – اجتماعی می‌باشد که در جدول (۱) معیارها و برخی از منابع مورد استفاده ارائه شده است.

بارندگی: یکی از معیارهای لازم برای طراحی یک سیستم جمع‌آوری آب، ویژگی‌های بارش شامل شدت و توزیع بارندگی می‌باشد. در دسترس بودن سری‌های زمانی و مکانی توزیع بارندگی برای تعیین رابطه بارش - رواناب و رطوبت قابل دسترس مهم است (Prinze & Singh, 2000). در این مطالعه نقشه مقدار بارش حوضه با استفاده از رابطه بارش ـ ارتفاع استخراج شده از هشت ایستگاه باران‌سنجی منطقه و استفاده از مدل رقومی ارتفاع[1] با دقت مکانی ۳۰ متر به دست آمد.

جدول ۱- معیارهای مورد استفاده به‌منظور مکانیابی تراس و بانکت و منابع مورد بررسی

معیار	منابع مورد بررسی
اقلیم (بارندگی)	Gruma و همکاران، ۲۰۱۶؛ Tumbo و همکاران، ۲۰۰۷؛ Mbiliniy و همکاران، ۲۰۰۷؛ Krois و Schulte، ۲۰۱٤؛ Critchley و همکاران، ۱۹۹۱. Hudson، ۱۹۸۷
هیدرولوژی (الگوی زهکشی، رواناب) توپوگرافی (شیب) خاک (بافت و عمق خاک) کشاورزی (کاربری اراضی)	Gruma و همکاران، ۲۰۱۶؛ Tumbo و همکاران، ۲۰۰۷؛ Mbiliniy و همکاران، ۲۰۰۷؛ Krois و Schulte ، ۲۰۱٤؛ Critchley و همکاران، ۱۹۹۱؛ Hudson، ۱۹۸۷؛ Madan و همکاران، ۲۰۱٤؛ FAO، ۱۹۹۰.
اقتصادی ـ اجتماعی	Krois و Schulte ، ۲۰۱٤

رواناب: در این تحقیق مقدار رواناب با استفاده از روش شماره منحنی[2] یا CN به دست آمد. شماره منحنی با استفاده از گروه هیدرولوژیکی خاک و کاربری اراضی برای بخش‌های مختلف حوضه برآورد می‌شود. نقشه شماره منحنی از ترکیب نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و نقشه پوشش گیاهی برای هر واحد هیدرولوژیکی به دست آمد و عمق رواناب با در نظر گرفتن حداکثر بارندگی ۲٤ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد (مهدوی، ۱۳۹۲).

1 Digital Elevation Model (DEM)
2 Curve Number (CN)

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (۱)$$

در رابطه (۲)، Q: عمق رواناب به میلی‌متر P: حداکثر بارندگی ۲٤ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال به میلی‌متر است همچنین Ia، S به ترتیب نگهداشت اولیه و حداکثر نگهداشت سطحی است که به ترتیب از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آید.

$$I_a = 0.2\,S \quad (۲)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (۳)$$

برای تعیین حداکثر بارندگی روزانه حوضه از آمار بارندگی ایستگاه باران‌سنجی ایستگاه گردنه کلات به‌عنوان ایستگاه معرف حوضه در سطوح احتمال مختلف استفاده شد.

شیب: معیار شیب به‌عنوان مهم‌ترین عامل در انتخاب مکان مناسب احداث تراس و بانکت است (Hudson, 1987). بعضی از انواع بانکت‌ها در دامنه‌های با شیب تند نیز قابل احداث می‌باشند که تعداد آن‌ها محدود و نگهداری آن‌ها مشکل است (Hudson, 1987). بااین‌حال شیب‌های بیشتر از ۵٪ به دلیل رواناب بیشتر، مستعد فرسایش می‌باشند (Tumbo et al., 2007). در این تحقیق نقشه شیب حوزه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار Arc GIS 10.3 در ۵ طبقه تهیه شد.

خاک: بافت خاک یکی دیگر از ویژگی‌های مهم و تعیین‌کننده میزان جذب و ذخیره‌سازی آب در خاک است. به‌طورکلی خاک‌های با بافت درشت و متوسط به دلیل منافذ درشت در سطح خاک و سرعت نفوذ آب در خاک برای حفاظت آب‌وخاک مناسب‌ترند همچنین خاک‌های عمیق نسبت به کم عمق ظرفیت ذخیره‌سازی بالاتر و مقدار بیشتری مواد مغذی جهت رشد گیاه دارا می‌باشند و برای اقدامات تراس و بانکت مناسب‌تر می‌باشند. در مطالعه حاضر نقشه بافت و عمق حوضه کاخک از مطالعات تفصیلی – اجرایی حوضه اخذ و در سامانه اطلاعات جغرافیایی رقومی شد.

کاربری اراضی: بانکت بیشتر در اراضی با تراکم پوشش گیاهی کم مانند مراتع و تراس در اراضی کشاورزی با ارزش زمین بالا احداث می‌شود (Tumbo et al., 2007). در این تحقیق نقشه کاربری اراضی ارائه شده در مطالعات تفصیلی – اجرایی حوضه، مورد استفاده قرار گرفت که شامل کاربری کشاورزی، مرتع، روستا و مسیل می‌باشد. در این نقشه کاربری مرتع با ۳۳٦٥/۹ هکتار بیشترین مساحت و کشاورزی و باغات به ترتیب با مساحت ۱۸٦/۱ و ٦۷/٤۷۳ هکتار در رده‌های بعدی می‌باشند.

فاصله از شبکه زهکشی: طبق تحقیقات هادسون تراس و بانکت در فاصله بیشتر از ۳۵۰ متر از شبکه زهکشی قابلیت ندارد. از طرف دیگر هر چه فاصله از شبکه زهکشی بیشتر باشد تبخیر و تعرق نیز بیشتر می‌باشد همچنین هر

چه تراکم زهکشی بالاتر باشد تجمع رواناب بیشتر می‌شود (Tumbo et al., 2007). در این مطالعه نقشه‌ای با فواصل ۱۲۵-۰ متر، ۲۵۰-۱۲۵، ۳۵۰-۲۵۰، ۵۰۰-۳۵۰ و بیشتر از ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد.

دسترسی به جاده: دسترسی به جاده از عواملی است که به‌طور غیر مستقیم در رتبه‌بندی مناطق مختلف برای اجرای اقدامات حفاظت آب‌وخاک مؤثر می‌باشد هرچه فاصله از جاده کمتر باشد به دلیل کاهش هزینه احداث، مناسب‌تر است. در این تحقیق نقشه‌ای از فاصله از جاده به فواصل ۰/۵ تا ۱ کیلومتر، ۲-۱، ۳-۲ و ٤-۳ کیلومتر در نظر گرفته شد.

۲-۳- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

تحلیل سلسله مراتبی در برگیرنده‌ی مجموعه‌ای از قضاوت‌ها و ارزش‌گذاری به یک شیوه‌ی منطقی است. به‌طوری که از یک طرف وابسته به نظرات شخصی و طرح‌ریزی سلسله مراتبی یک مساله است و از طرف دیگر با منطق، درک و تجزیه وتحلیل، برای تصمیم‌گیری و قضاوت نهایی مرتبط می‌شود (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۰). در این تحقیق جهت ساخت درخت سلسله مراتب، معیارهای مؤثر در انتخاب مکان مناسب تراس و بانکت از منابع مختلف گردآوری گردید (جدول ۱). به‌منظور مقایسه زوجی پرسشنامه‌ای بر مبنای وزن‌دهی Saaty (۱۹۸۰) از مقیاس ۱ (اهمیت کمتر) تا ۹ (بیشترین اهمیت) برای هر معیار طراحی شد و در اختیار ۵۰ متخصص آبخیزداری قرار گرفت. به‌منظور اطمینان از صحت پاسخ‌دهی، نرخ ناسازگاری[1] مقایسات با استفاده از رابطه (٤) محاسبه شد و نظرات با نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت (آذر و معماریانی، ۱۳۷۳).

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad (٤)$$

در رابطه (۵) CR نرخ ناسازگاری و RI شاخص تصادفی[2] است که براساس تعداد معیارها به دست می‌آید. همچنین CIیا شاخص ناسازگاری از رابطه (۵) به دست می‌آید. در رابطه (۵) λmax بزرگ‌ترین مقدار ویژه است که حاصل میانگین عناصر ماتریس مقایسات زوجی است و n نیز تعداد معیارها است.

$$CI = \lambda max - \frac{n}{n-1} \qquad (۵)$$

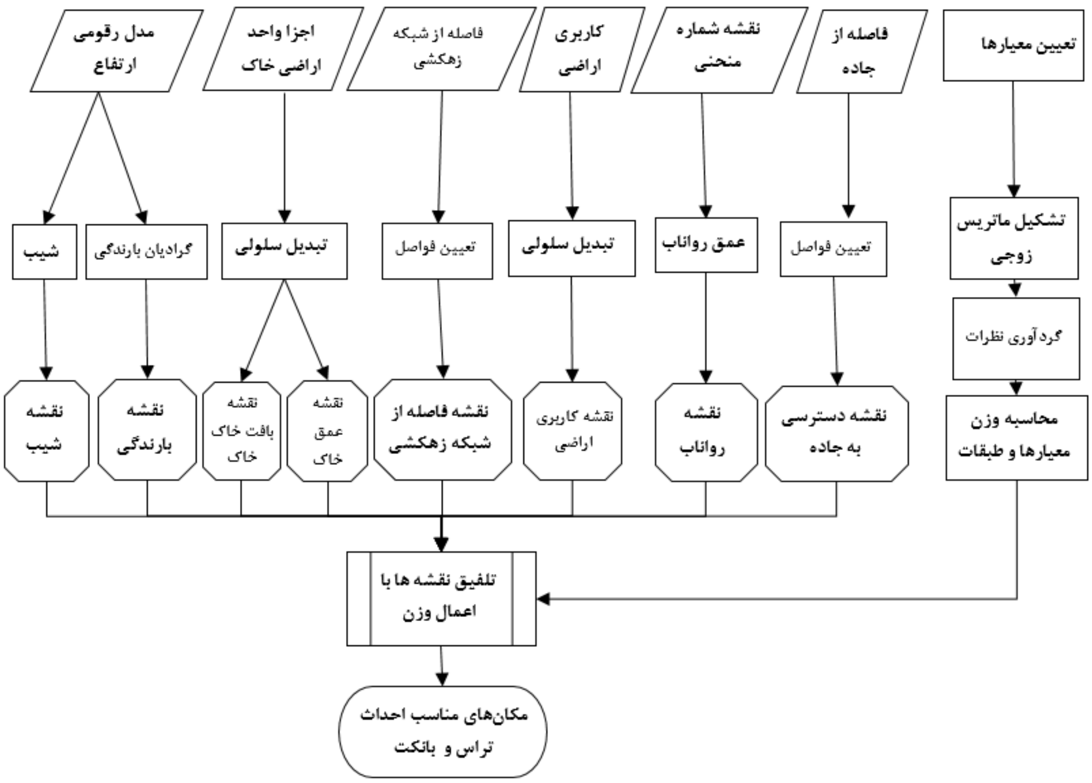
در مرحله بعد با بررسی منابع و مطالعات مرتبط، سطح تناسب هر طبقه از معیارهای هشت‌گانه با وزن‌دهی به طبقات مختلف تعیین شد به این صورت که به هر طبقه امتیازی از ۱ تا ۹ اختصاص داده شد که برای تمام فاکتورها عدد ۱ دارای کم‌ترین تناسب و عدد ۹ مناسب‌ترین طبقه است. در جدول (۲) میزان تناسب طبقات معیارها ارائه شده است.

1 Inconsistency Rate
2 Inconsistency random index

وزن‌های نرمال شده در سامانه اطلاعات جغرافیایی بر روی نقشه معیار مربوطه اعمال و تبدیل به نقشه سلولی گردید. سپس جهت به دست آوردن نقشه مناطق مناسب برای هر اقدام حفاظتی، نقشه‌های سلولی معیارهای مختلف که دارای ارزش وزن‌های نرمال شده می‌باشد با روش ترکیب وزنی خطی[1] و طبق رابطه (٦) تلفیق گردید (Krois & Schulte, 2014).

$$SLI_{yj} = \sum RIW_{yi} \ . SL_{yi} \qquad (٦)$$

در رابطه (٦) SLI_{yj} شاخص سطح تناسب برای هر اقدام y در سلول j، RIW_{yi} وزن نسبی هرلایه ورودی i برای هر اقدام y و SL_{yi} سطح تناسب برای هر لایه ورودی i برای اقدام y است. هر چه مقدار SLI_{yj} بیشتر باشد تناسب سلول j جهت احداث تراس یا بانکت نیز بیشتر است. در نهایت بر اساس شاخص سطح تناسب طبقات مختلف تفکیک گردید.



شکل ۲- نمودار جریانی تحقیق برای مکان‌یابی تراس و بانکت

1 Weighted Linear Combination(WLC)

جدول ۲- سطوح تناسب برای معیارهای مختلف جهت شناسایی سایت‌های مناسب تراس و بانکت

معیار	سطح تناسب				
	بسیار مناسب (۹)	**مناسب (۷)**	**نسبتاً مناسب (۵)**	**تناسب کم (۳)**	**نامناسب (۱)**
شیب (درجه)	۱۸–۳۰	۱۰–۱۸	۵–۱۰	۲–۵	۰–۲
بارندگی (میلی‌متر/ سال)	۴۰۰–۴۳۹	۳۶۰–۴۰۰	۳۳۰–۳۶۰	۳۰۰–۳۳۰	۲۴۹–۳۰۰
رواناب (میلی‌متر)	۲۰<	۱۵–۲۰	۱۰–۱۵	۵–۱۰	۰–۵
بافت خاک (تراس‌بندی)	لومی– شنی	لومی و رسی– شنی	لومی –رسی	شنی –لومی و رسی – شنی	طبقات دیگر
بافت خاک (بانکت‌بندی)	رسی	رسی– سیلتی	رسی– شنی	لومی شنی و لومی رس شنی	طبقات دیگر
عمق خاک (سانتی‌متر)	>۱۰۰	۵۰–۱۰۰	۳۰–۵۰	۱۰–۳۰	<۱۰
کاربری اراضی	کشاورزی و باغات	مرتع	–	–	مسیل و روستا
فاصله از شبکه زهکشی (متر)	۰–۱۲۵	۱۲۵–۲۵۰	۲۵۰–۳۵۰	۳۵۰–۵۰۰	>۵۰۰
فاصله از جاده (کیلومتر)	۰–۰/۵	۰/۵–۱	۱–۲	۲–۳	۳–۴

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسات زوجی و وزن‌دهی به معیارها

با بررسی منابع معیارهای بارندگی، رواناب، شیب، کاربری اراضی، فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از جاده، بافت و عمق خاک انتخاب شد که در پرسش‌نامه مقایسات زوجی گنجانده شد (جدول ۱). در این مطالعه بر حسب تعداد معیارها و طبق جدول ارائه شده توسط Saaty و همکاران (۱۹۸۰) شاخص ناسازگاری تصادفی برابر با ۱/۴۱ و نرخ ناسازگاری ماتریس نهایی ۰/۰٦ به دست آمد که با توجه به دامنه تعریف شده توسط Saaty و همکاران (۱۹۸۰) (CR<0.1) سازگار می‌باشد.

پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی و امتیازدهی به معیارها، وزن نهایی هر معیار به شرح جدول (۳) به دست آمد. بر اساس جدول (۳) عامل شیب و رواناب به ترتیب بیشترین وزن را دارند و بیشترین نقش در تعیین مناطق مناسب برای اجرای تراس و بانکت را دارا هستند. در تحقیقات مشابه نظیر Krois و Schulte (۲۰۱٤) و Tumbo و همکاران (۲۰۰۷) نیز معیار شیب بیشترین وزن و اهمیت را داشته است. در مطالعه Mbilinyi و همکاران (۲۰۰۷)

معیارهای بارندگی و شیب اولویت بیشتری دارا می‌باشند. عامل فاصله از آبراهه نیز کمترین وزن را دارد که بیانگر اهمیت کمتر نسبت به عوامل دیگر است.

جدول ۳- وزن نسبی معیارهای مؤثر در انتخاب مکان تراس و بانکت

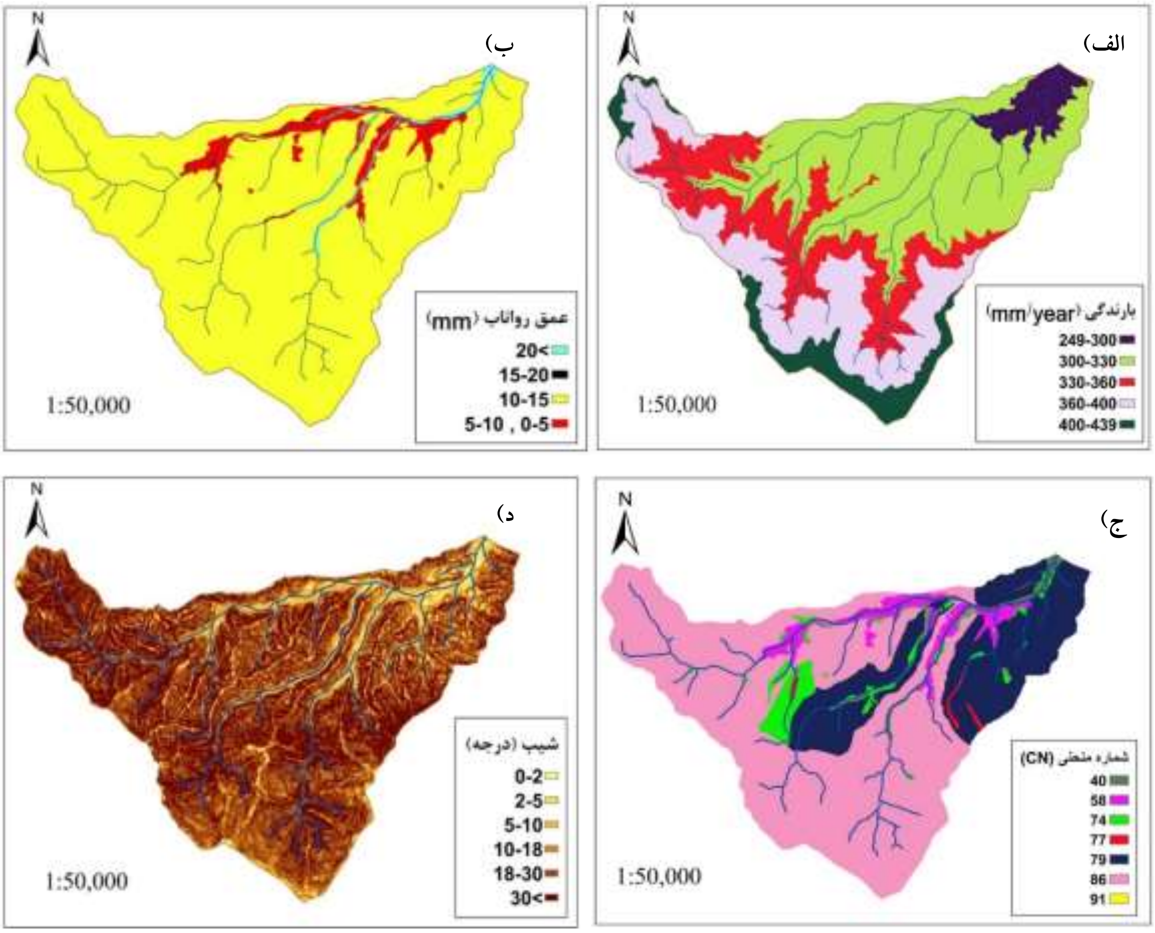
معیارها	وزن
بارندگی	۰/۱۰۹
رواناب	۰/۲۱۳
شیب	۰/۲۲٦
بافت خاک	۰/۲۰۵
عمق خاک	۰/۰۷۲
فاصله از آبراهه	۰/۰۲۵
کاربری اراضی	۰/۱۱۸
دسترسی به جاده	۰/۰۲٦

۳-۲- معیارهای مؤثر در مکان‌یابی

بارندگی: با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و رابطه بارش- ارتفاع (رابطه ۱) نقشه بارش حوضه تهیه شد که شکل (۳-الف) توزیع بارش در سطح حوضه را نشان می‌دهد. براین اساس بارندگی سالانه حوضه از ۲٤۹ میلی‌متر در بخش‌های شمالی تا ٤۳۹ میلی متر در قسمت جنوب حوضه متغیر می‌باشد. منابع مختلف حداقل بارش سالانه جهت ذخیره رواناب را ۲۰۰ میلی‌متر ذکر می‌کنند که در این صورت حوضه محدودیتی ندارد (Prinze & Singh, 2000).

رواناب: با استفاده از نقشه شماره منحنی حوضه (شکل ۳-ج) و بارندگی ۲٤ ساعته حوضه نقشه عمق رواناب حوضه تهیه شد که در شکل (۳-ج) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۳-ج) عمق متوسط رواناب برای حوضه از ۱/۹۷ میلی‌متر تا ۱۷/۲۹ میلی‌متر متغیر است. کمترین رواناب در بخش شمالی حوضه وجود دارد که به دلیل بارندگی کمتر و خاک نفوذپذیر با پوشش گیاهی بیشتر می‌باشد و بیشترین رواناب در قسمت‌های شیبدار و مراتع فقیر با پوشش گیاهی کم وجود دارد که قابلیت بیشتری در ایجاد رواناب دارند.

شیب: نقشه شیب حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع حوضه کاخک در ٦ کلاس تهیه گردید (شکل ۳-د). بر اساس شکل (۳-د) شیب حوضه کاخک از ۰ تا ٥٥ درجه متغیر می‌باشد. بر طبق مطالعات انجام شده شیب‌های ۳۰-۱۸ و ۱۸-۱۰ درجه به ترتیب بهترین حالات جهت احداث تراس و بانکت را دارا می‌باشند و شیب‌های ۲-۰ و ۳۰< درجه نامناسب می‌باشند (Madan et al., 2014 ؛Krois & Schulte, 2014) که ٤٦ درصد از سطح حوضه این شرایط را دارا می‌باشد.



شکل۳- نقشه بارندگی (الف)، عمق رواناب (ب)، نقشه شماره منحنی (ج) و نقشه شیب (د) حوضه کاخک

کاربری اراضی: کاربری اراضی حوضه کاخک شامل ٤ کاربری می‌باشد که با استفاده از مطالعات حوضه و پردازش تصویر به روز رسانی شده است (شکل ٤- الف). بخش اعظم حوضه را مراتع (٪۷۰) در برمی گیرد و کمترین وسعت با مناطق مسکونی روستایی (٪۵) اشغال شده است. سایر کاربری‌ها شامل اراضی کشاورزی (٪۱۵) و مسیل (٪۱۰) است. بر اساس شکل (٤- الف) کاربری‌های کشاورزی و مراتع جهت احداث تراس و بانکت مناسب می‌باشند.

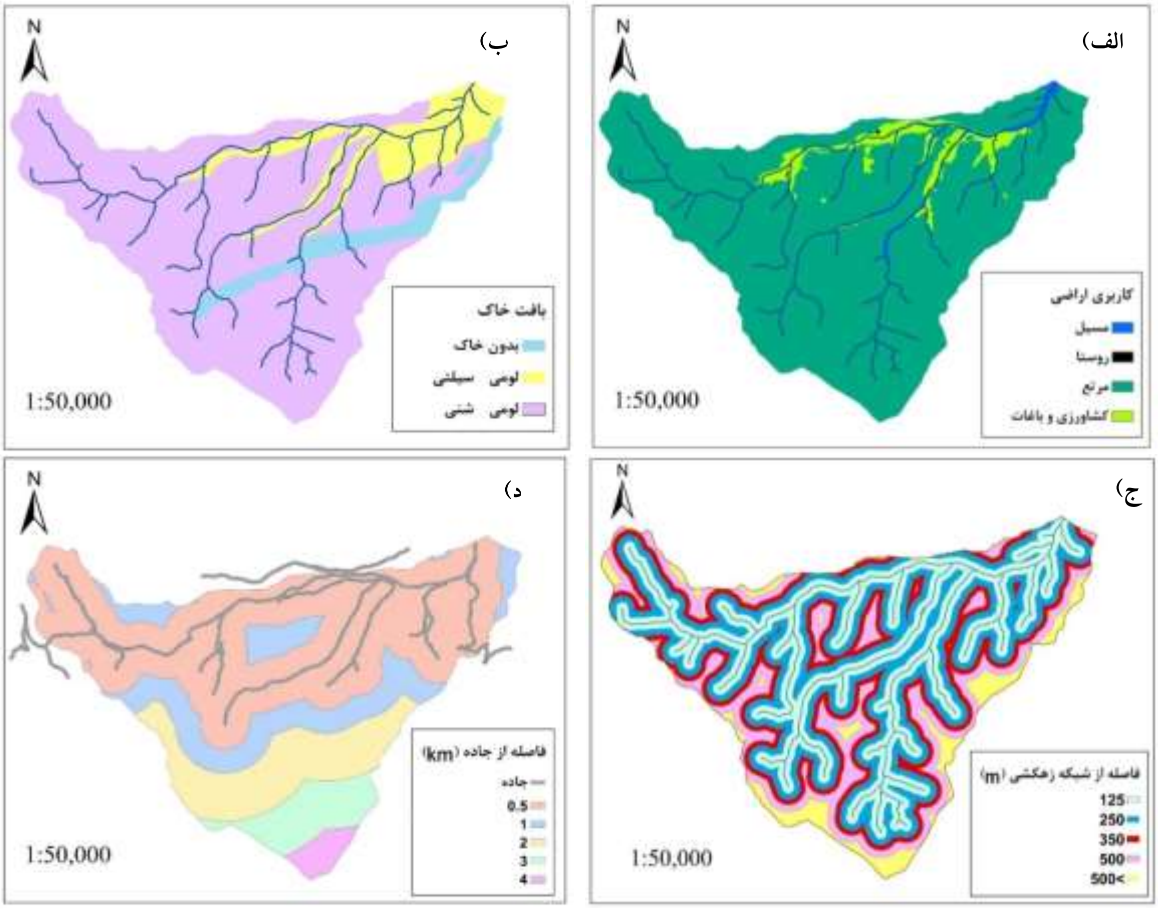
خاک: بافت خاک حوضه شامل لومی ـ شنی (٪۳۰) و لومی ـ رسی (٪۲۵) می‌باشد و ۱۵ درصد از سطح حوضه بدون خاک می‌باشد. بر اساس شکل (٤-ب) مناطق دارای بافت لومی ـ شنی با خاک عمیق بیشترین تناسب جهت احداث تراس و بانکت را دارند.

الگوی زهکشی: نقشه فاصله از آبراهه (شکل ٤–ج)، از روی نقشه شبکه زهکشی حوضه با فواصل ۱۲۵–۰ (بسیار مناسب)، ۲۵۰–۱۲۵ (تناسب خوب)، ۳۵۰–۲۵۰ (نسبتاً مناسب)، ۵۰۰–۳۵۰ (تناسب کم) و بیشتر از ۵۰۰ متر (نامناسب) تهیه شد و تناسب هر طبقه بر اساس منابع اعمال گردید.

دسترسی به جاده: مناطق مناسب برای اجرای تراس و بانکت در صورت نزدیکی به جاده، از ارجحیت نسبی برخوردارند. بدین منظور نقشه فاصله از جاده با فواصل ۰/۵ تا ۱ کیلومتر، ۲–۱ کیلومتر، ۳–۲، ٤–۳ و بیشتر از ٤ کیلومتر در نظر گرفته شد (شکل ٤–د).

۳–۳– مناطق مناسب احداث تراس و بانکت

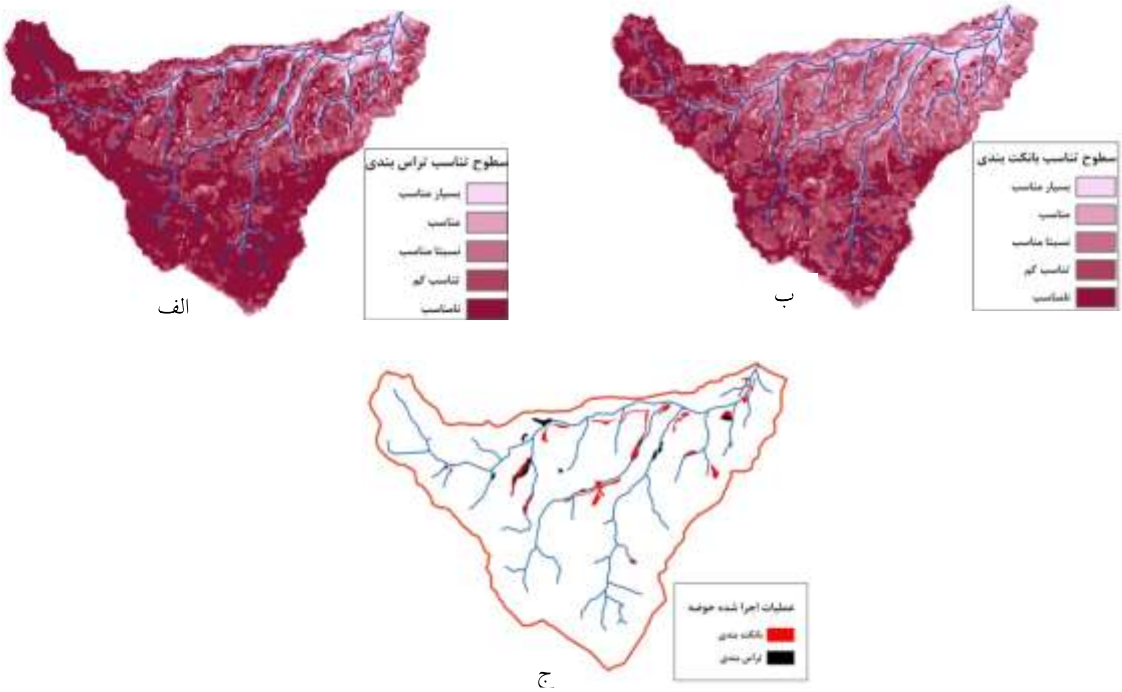
نقشه مناطق بالقوه جهت احداث تراس و بانکت با ترکیب وزنی لایه‌های شیب، رواناب، بارندگی، عمق خاک، بافت خاک، کاربری اراضی، شبکه زهکشی و دسترسی به جاده ایجاد شد بدین منظور پس از سلولی کردن تمام نقشه‌ها و طبقات مختلف با اعمال رابطه (۷) در نرم‌افزار Arc GIS نقشه نهایی تهیه گردید. براساس نقشه نهایی مکان‌های مناسب احداث تراس (شکل ٥– الف)، حوضه کاخک به ٥ منطقه بسیار مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، تناسب کم و نامناسب تفکیک شد. منطقه بسیار مناسب در حدود ۱/٥٤ کیلومتر مربع (٤٪) می‌باشد که در بخش شرقی و مرکزی حوضه قرار دارد. همچنین منطقه مناسب با مساحت ۲/٦۹ کیلومتر مربع (۷٪) از حوضه را شامل می‌شود. مناطق نسبتاً مناسب که به صورت پراکنده قرار دارد به مساحت ٤ کیلومتر مربع (۱۱٪) است. در حدود ۲۹ و ٤۷ درصد از سطح حوضه مناطق با تناسب کم و نامناسب می‌باشد که در قسمت‌های غربی و جنوب غربی و در ارتفاعات بالا قرار گرفته است. طبقات بسیار مناسب و مناسب را در پایین دست حوضه و نزدیک به خروجی حوزه می‌توان مشاهده کرد که علت آن کاهش شیب، تمرکز آبراهه‌ها و وجود خاک عمیق و مناسب است. در حالی که در قسمت بالادست حوزه با وجود بیشتر بودن مقدار بارندگی به دلیل محدودیت‌های شیب و خاک امکان ایجاد تراس وجود ندارد. بیشتر مناطق مناسب احداث تراس در شیب‌های ٥ تا ۳۰ درجه با خاک لومی شنی می‌باشند که این با نتایج هادسون (۱۹۸۱) مطابقت دارد.



شکل ٤- نقشه کاربری زمین (الف)، بافت خاک (ب)، فاصله از شبکه زهکشی (ج) و فاصله از جاده (د) حوضه کاخک

سطوح تناسب تراس و بانکت به جز در معیار بافت خاک و در انواعی از بانکت ها بـه صـورت جزئـی در معیـار شیب با هم یکسان می‌باشند. بر همین اساس مناطق شمال شرقی و مرکزی حوضـه (شـکل ٥-ب) بـا مسـاحت ۱/۸۰ کیلومتر مربع (۵٪) در طبقه بسیار مناسب و ٥/١٦ کیلومتر مربع (١٤٪) حوضه در طبقه مناسـب بـرای احـداث بانکـت قرار دارد. مساحتی از حوضه به وسعت ۸/۵۹ کیلومتر مربع (۲۳٪) مناطق با سطح نسبتاً مناسب بـرای احـداث بانکـت تشکیل می‌دهد که در بخش شمال شرقی تا شمال غربی حوضه واقع شده است. این مناطق در دامنه‌های نسـبتاً شـیب-دار (۱۰-۵ درجه) با خاک‌های لومی رسی و لومی سیلتی واقع شـده‌انـد. Hudson (۱۹۸۱) شـیب‌هـای کمتـر از ٥-٢ درجه و بیشتر از ۳۰ درجه را مناسب بانکت می‌داند همچنین خاک‌های با رس بیشتر را برای بانکت توصـیه مـی‌کننـد زیرا این خاک‌ها دارای ذرات کوچک‌تر و سطح نگهداشت آب بیشتری هستند و از طرفی فرسـایش کمتـری در آن‌هـا مشاهده می‌شود که در تحقیقات مبیلینی و همکاران (۲۰۰۷) و کرویس و شولت (٢٠١٤) هم به آن اشـاره شـده اسـت.

۱۱/۲۰ و ۹/۲۹ کیلومتر مربع از حوضه در طبقات تناسب کم و نامناسب قرار گرفته است که این مناطق بـه ترتیـب ۳۱ و ۲۵ درصد از کل حوضه را شامل می‌گردند و با محدودیت شیب و عمق خاک مواجه‌اند.

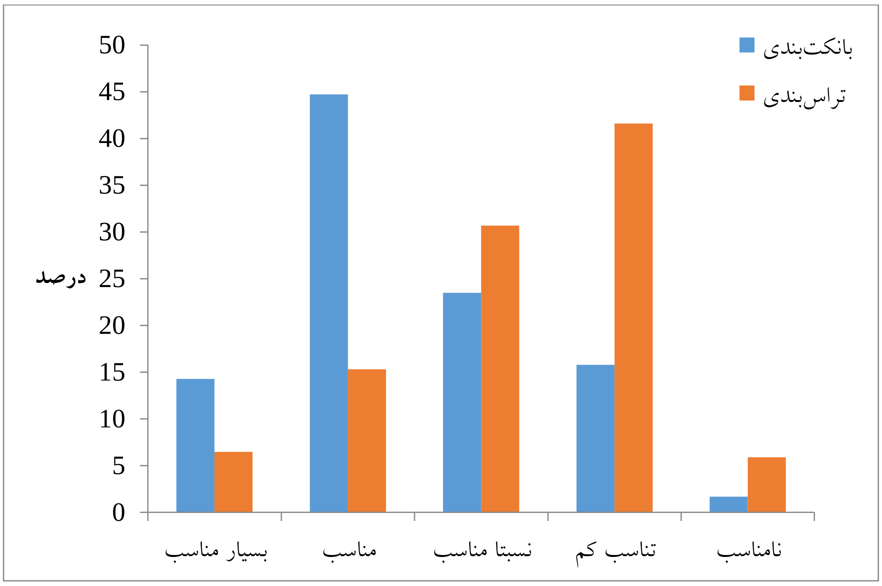


شکل ۵- نقشه مناطق مناسب تراس (الف)، بانکت (ب) و عملیات اجرا شده (ج) در حوضه کاخک

۳-٤- ارزیابی نتایج با اقدامات اجرایی حوضه

بر طبق مطالعات ارزیابی اقدامات آبخیـزداری حوضـه، بـه‌ترتیـب ۱۸/۹ هکتـار و ٦۱/۸ هکتـار عملیـات تـراس و بانکت در حوضه اجرا شده است که موقعیت این اقدامات در شکل ۵-ج ارائه شده اسـت (اداره کـل منـابع طبیعـی و آبخیزداری خراسان رضوی، ۱۳۸٦). مقایسه نتایج مربوط به پژوهش حاضر با اقدامات اجرا شده (شـکل ٦) دلالـت بـر این موضوع دارد که ٦/۵ درصد تراس‌های اجرا شده در طبقه بسیار مناسب و ۱۵/۳ درصد در طبقه مناسب واقـع شـده است. ۳۰/۷ درصد تراس‌های اجرایی در طبقه نسبتاً مناسب واقع شده است. این در حـالی اسـت کـه ۱٤/۳ درصـد از بانکت‌های احداث شده در سطح بسیار مناسب و به ترتیـب ٤٤/۷ و ۲۳/۵ درصـد آن‌هـا در سـطوح مناسـب و نسـبتاً مناسب قرار دارد. بنابراین بیشتر اقدامات اجرا شده در بانکت‌بندی در طبقه بسیار مناسب قـرار دارد. عـدم انطبـاق بـین مناطق اجرایی و نتایج تحقیق می‌تواند به دلیل در نظر گرفتن معیارهای دیگر نظیـر بهـره‌گیـری از مشـارکت مردمـی و جنبه ترویجی اقدامات باشد. در مجموع استفاده از سیستم پشتیبان تصمیم تنها یاریگر مـدیران در اتخـاذ تصـمیم مـی-

باشد و تصمیم نهایی در خصوص مکانیابی نیازمند در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف از جمله مسائل اقتصادی ـ اجتماعی و اثرات زیست محیطی است.



شکل ٦- درصد مساحت تطبیقی عملیات اجرا شده و پیشنهادی حوزه کاخک

٤- جمع‌بندی

انتخاب مکان مناسب و اولویت‌بندی اقدامات حفاظت آب‌وخاک در سطح آبخیز یکی از نیازهای اساسی مدیریت مؤثر حوزه‌های آبخیز است که زمینه استفاده مناسب از منابع همراه با حداکثر تاثیرگذاری را فراهم می‌آورد. این اقدام نیاز به جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل حجم زیادی از اطلاعات دارد. با توجه به کاربرد روزافزون روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و تلفیق آن با داده‌های مکانی، این تحقیق با هدف ارائه یک سامانه پشتیبان تصمیم به‌منظور شناسایی و اولویت‌بندی عرصه‌های مناسب برای اجرای اقدامات حفاظت آب‌وخاک در حوضه کاخک در استان خراسان رضوی انجام شد. بدین منظور معیارهای لازم شامل شیب، بارندگی، رواناب، بافت خاک، عمق خاک، کاربری اراضی و فاصله از الگوی زهکشی از منابع مختلف گردآوری شد و با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی اهمیت نسبی هر معیار و طبقات هر معیار تعیین گردید. با اعمال وزن‌های نهایی در نقشه‌های معیارها در سامانه اطلاعات جغرافیایی نقشه تناسب حوضه برای هر اقدام تعیین شد. نتایج نشان دارد که ٤ و ۷ درصد از سطح حوزه به ترتیب بسیار مناسب و مناسب برای احداث تراس می‌باشد از طرفی ۵ و ١٤ درصد به ترتیب بسیار مناسب و مناسب برای احداث بانکت است. مقایسه وسعت عملیات اجرا شده با نتایج تحقیق نشان داد که ۵۹ درصد بانکت‌ها و ۲۱/۸ درصد تراس‌های اجرا شده در حوضه در طبقات بسیار مناسب و مناسب واقع شده است و بیشتر وسعت اجرایی در

طبقه نسبتاً مناسب قرار می‌گیرد. عدم انطباق نتایج با اقدامات اجرایی به دلیل لحاظ عوامل و معیارهای دیگر نظیر مباحث اقتصادی ـ اجتماعی و جنبه‌های مشارکت مردمی در اجرای اقدامات می‌باشد؛ زیرا سیستم‌های پشتیبان تصمیم اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری بهتر را در اختیار مدیر قرار می‌دهند و تصمیم نهایی بر اساس عوامل متعدد اخذ می‌شود. در مجموع کاربرد سیستم حاضر می‌تواند در تصمیم‌گیری بهتر مدیران آبخیز و دست‌اندرکان حفاظت آب‌وخاک حوضه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین تحقیقات بیشتر با هدف ارزیابی روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره با لحاظ معیارهای بیشتر و ارزیابی میدانی نتایج توصیه می‌گردد.

کتابنامه

ابراهیمی محمدی، شیرکو؛ آذری، محمود؛ انتظامی، هیرش؛ ۱۳۹۰. بررسی نهشته‌های کواترنر دشت دهگلان در سنندج جهت تعیین مناطق مستعد پخش سیلاب. چاپ در *مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران*. مشهد. صص ١٤-١.

اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری خراسان رضوی؛ ۱۳۸٦. *مطالعات ارزیابی اقدامات آبخیزداری حوزه کاخک گناباد*. ۱۸۷ص.

آذر، عادل؛ معماریانی، عزیزالله؛ AHP.۱۳۷۳ تکنیکی نوین برای تصمیم گیری گروهی. *فصل‌نامه دانش مدیریت*. شماره ۲۷ و ۲۸. صص۳۲-۲۲.

اسمعلی، اباذر؛ عبداللهی، خدایار؛ ۱۳۸۹. *مدیریت آبخیزداری و حفاظت خاک*. انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی.

آل شیخ، علی اصغر؛ سلطانی، محمد جعفر؛ هلالی، حسین؛ ۱۳۸۱. کاربرد GIS در مکان‌یابی عرصه‌های پخش سیلاب. *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*. شماره ٤. صص۳۸-۲۲.

پیرمرادی، رضا؛ نخعی، محمد؛ اسدیان، فریده؛ ۱۳۸۹. تعیین مناطق مناسب برای احداث سد زیرزمینی با استفاده از GIS و AHP. حوضه دشت ملایر در استان همدان. *مجله جغرافیا محیطی*. شماره ۸. صص٦٦-٥١.

چابک بلداجی، مسلم؛ حسن زاده نفوتی، محمد؛ ابراهیمی خوسفی، زهره؛ ۱۳۸۹. مکان‌یابی عرصه پخش سیلاب با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در حوضه عشق آباد طبس. *مجله علوم مهندسی و آبخیزداری ایران*. شماره ۱۳. صص۸-۱.

چزگی، جواد؛ مرادی، حمید رضا؛ خیرخواه، میرمسعود؛ ۱۳۸۹. مکان‌یابی محل‌های مناسب جهت احداث سد زیرزمینی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره با تاکید بر منابع آب درحوضه غرب استان تهران. *مجله علوم مهندسی و آبخیزداری ایران*. شماره ۱۳. صص٦٨-٦٥.

حبیبی، علی؛ ۱۳۹۱. تلفیق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مکان‌یابی محل‌های مناسب جهت تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در حوضه خلیج گرگان. *دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان*. دانشگاه گرگان.

خاشعی سیوکی، عباس؛ قهرمان، بیژن؛ کوچک زاده، مهدی؛ ۱۳۹۰. ارزیابی پتانسیل استحصال آب از آبخوان از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی در دشت نیشابور. *مجله پژوهش آب ایران*. شماره ۹. صص ۱۸۰-۱۷۱.

خیرخواه آرزو؛ محمدی فاطمه؛ معماریان هادی؛ ۱۳۹٤. تعیین مناطق مستعد استحصال و ذخیره سازی آب باران با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رود سراب شهرستان خوشاب استان خراسان رضوی. چاپ در *مجموعه مقالات کنفرانس ملی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران*. مشهد. ص ۱-۱٤.

رمضانی مهریان، مجید؛ ملک محمدی، بهرام؛ جعفری، حمیدرضا؛ رفیعی، یوسف؛ ۱۳۹۰. مکان‌یابی محل‌های انجام عملیات تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی با بکارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی در دشت شمیل و آشکارا هرمزگان. *مجله علمی_ پژوهشی علوم مهندسی و آبخیزداری ایران*. شماره ۱٤. صص ۱-۱۰.

سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور؛ ۱۳۸۷. مبانی طراحی و راهنمای اجرای سازه‌های کنترل فرسایش (دستورالعمل و ضوابط فنی طراحی و اجرای بانکت بندی). نشریه شماره ۱-٤٥۰. جلد اول.

سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور؛ ۱۳۸۸. مبانی طراحی و راهنمای اجرای سازه‌های کنترل فرسایش (دستورالعمل و ضوابط فنی طراحی و اجرای تراس‌بندی). نشریه ۳-٤٥۰. جلد سوم.

قدسی پور، سید حسن؛ ۱۳۸٤. *فرآیند تحلیل سلسله مراتبی*. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

ملکی، امجد؛ حصادی، همایون؛ نادریان، پروین؛ ۱۳۸۸. مکان‌یابی تغذیه مصنوعی آبخوان حوضه آبریز مرگ. *تحقیقات جغرافیایی*. شماره ۱. صص ۸۷-۵۳.

مهدوی، عاطفه؛ نوری امامزاده‌یی، محمدرضا؛ مهدوی نجف‌آبادی، رسول؛ طباطبائی، سیدحسن؛ ۱۳۸۹. مکان‌یابی عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی به روش منطق فازی در حوضه آبریز دشت شهرکرد. مجله *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌وخاک*، شماره ٥٦، صص۷۸-٦۳.

مهدوی، محمد؛۱۳۸۱. *هیدرولوژی کاربردی*. انتشارات دانشگاه تهران.

نادری، نگاه؛ محسنی ساروی، محسن؛ ملکیان، آرش؛ قاسمیان، داوود؛ ۱۳۹۰. فرایند تحلیل سلسله مراتبی تکنیکی برای تصمیم‌گیری در حوضه‌های آبخیز. *مجله محیط‌زیست و توسعه*. شماره. صص٤۱ -٥۰.

Critchley, W., Siegert, K., Chapman, C., & Finket, M., 2013. Water harvesting: A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production. Scientific Publishers.

De Winnaar, G., Jewitt, G. P. W., & Horan, M., 2007. A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32: 1058-1067.

FAO., 1990. Guidelines for soil description. 3th edition.

Gruma, B., R. Hesseb, and A. Kesslerc. K. Woldearegayd. E. Yazewe. C. Ritsemac. V. Geissen., 2016. A decision support approach for the selection and implementation of water harvesting techniques in arid and semi-arid regions. Agricultural Water Management، 173: 35–47.

Hudson, N., 1987. Soil and water conservation in semi-arid areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Vol 57.
Hunink, J. E., P. Droogers. and S. Kauffman. B. M. Mwaniki. J. Bouma., 2012. Quantitative simulation tools to analyze up- and downstream interactions of soil and water conservation measures: Supporting policy making in the Green Water Credits program of Kenya. Journal of Environmental Management. 111: 187-194.
Jaiswala, R. K., N. C. Ghoshb. And R. V. Galkatea. T. Thomas., 2015. Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) for watershed Prioritization.Aquatic Procedia 4: 1553 – 1560.
Krois, J., A. Schulte. 2014. GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru. Applied Geography. 51:131-241.
Madan, K.J., V. M. Chowdary. And Y. Kulkarni. B. C. Mal., 2014. Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis.Resources, Conservation and Recycling. 83: 96– 111.
Mbilinyi, B. P., S. D. Tumbo. And H. F. Mahoo. F. O. Mkiramwinyi., 2007. GIS based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting. Physics and Chemistry of the Earth. 32: 1074–1081.
Mendoza, G. A., H. Martins., 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. Forest Ecology and Management. 230: 1–22.
Prinz, D., & Singh, A., 2000. Technological potential for improvements of water harvesting. Gutachten für die World Commission on Dams.
Saaty, T. L., 1980. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation.
Tumbo, S. D., Mbilinyi, B. P., Mahoo, H. F., & Mkiramwinyi, F. O., 2006. Determination of suitability levels for important factors for identification of potential sites for rainwater harvesting. In Proceedings of the 7th WaterNet-WARFSA-GWP-SA Symposium, Lilongwe, Malawi.